



TEKSTİL VE MÜHENDİS
(Journal of Textiles and Engineer)



<http://www.tekstilvemuhendis.org.tr>

Termoplastik Kompozitler için Hibrit İplik Üretimi

Hybrid Yarns For Thermoplastic Composites: Manufacturing Methods and Properties

Müslüm KAPLAN
Bartın Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye

Online Erişime Açıldığı Tarih (Available online): 31 Mart 2016 (31 March 2016)

Bu makaleye atıf yapmak için (To cite this article):

Müslüm KAPLAN (2016): Termoplastik Kompozitler için Hibrit İplik Üretimi, Tekstil ve Mühendis, 23: 101, 61-79.

For online version of the article: <http://dx.doi.org/10.7216/1300759920162310106>

TERMOPLASTİK KOMPOZİTLER İÇİN HİBRİT İPLİK ÜRETİMİ

Müslüm KAPLAN*

Bartın Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye

Gönderilme Tarihi / Received: 08.01.2015

Kabul Tarihi / Accepted: 18.11.2015

ÖZET: Günümüzde elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemeler yüksek dayanım ve geri dönüştürülebilirlik özelliklerinden dolayı yaygın şekilde kullanılmaktadır. Üstün avantaj sağlayan bu özelliklerinin yanında yüksek erime viskozitesi ve düşük ısıl dayanım gibi özellikler bu malzemelerin zayıf yönünü oluşturmaktadır. Termoplastik malzemelerin çalışma şartlarını zorlaştıran ve üretim maliyetlerini arttıran yüksek erime viskozitesi gibi problemlerin çözülmesi için güçlendirici elyaf ve matrisin katı halde karıştırılması fikri geliştirilmiştir. Bunun sonucunda termoplastik kompozit üretiminde yarı mamul olarak birçok hibrit iplik kullanılmıştır. Bu çalışmada farklı iplik üretim yöntemleri, iplik yapıları ve özellikleri ayrıntılı olarak verilmektedir. Hibrit iplik üretim yöntemlerinin ve proses parametrelerinin, iplik yapısına ve özelliklerine etkisi incelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit iplik, termoplastik kompozit, commingling, güçlendirici elyaf, matris, preform

HYBRID YARNS FOR THERMOPLASTIC COMPOSITES: MANUFACTURING METHODS AND PROPERTIES

ABSTRACT: Recently, fiber-reinforced thermoplastic composite materials have been widely used due to their superior properties such as their fracture toughness and recyclability. Beside these superior properties, their high melting viscosity and low thermal resistance constitute their weaknesses. To overcome the problems such as high melting viscosity, which impede the operating conditions of thermoplastic materials and increase the costs, the idea of mixing reinforcing fiber with the matrix in solid state, has been developed. Consequently various kinds of hybrid yarn have been used as semi-product in the manufacturing of thermoplastic composite. In the present study different yarn manufacturing methods, yarn structures and properties are given in detail. The effect of hybrid yarn manufacturing methods, as well as the process parameters on the yarn structure and properties are characterized.

Key words: Hybrid yarns, thermoplastic composite, commingling, reinforcing fiber, matrix, preform

* *Sorumlu Yazar/Corresponding Author:* mkaplan@bartin.edu.tr

DOI: 10.7216/1300759920162310106, www.tekstilvemuhendis.org.tr

1. GİRİŞ

Küresel ısınma ve hava kirliliği son yıllarda oldukça üzerinde durulan konular olmuştur. İklim değişikliklerinin en büyük nedeninin artan karbondioksit (CO₂) salınımı olduğu vurgulanmaktadır. 1997 yılının Aralık ayında Japonya’da imzalanan Kyoto protokolü, küresel ısınma ve iklim değişikliği konularında katılımcı ülkeleri CO₂ ve sera etkisine neden olan diğer gazların salınımını azaltmaya yönelik çalışmalar yapma ve yasalar çıkarma yükümlülüğü altına sokmuştur. Bu kapsamda özellikle Avrupa Birliği (AB) ülkeleri çeşitli politikalar geliştirmişler ve 2050 yılına kadar CO₂ salınımını %80 oranında düşürmeyi hedeflemiştir. Bunun için Ar-Ge çalışmalarının yapılması ve yeni iş alanlarının açılması için önemli bütçeler ayrılmıştır [1].

CO₂ salınımının önemli bir kısmı ulaşım araçları tarafından gerçekleşmektedir. Alman Federal Çevre Bakanlığı, Almanya’da atmosfere salınan CO₂ gazının %20’sinin ulaşım araçlarından kaynaklandığını bildirmiştir [2]. AB, 2015 yılında binek araçlarda CO₂ salınımını 130 g/km’ye düşürmeyi hedeflemiştir [3].

Hedeflenen değerlere ulaşmak için bir yandan alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi çalışmaları sürdürülürken diğer yandan taşıtların daha hafif hale getirilmesine çalışılmaktadır. Ulaşım taşıtlarında CO₂ salınımını azaltmak için araçların ağırlıklarının azaltılması büyük önem arz etmektedir (Şekil 1). Bu nedenle mekanik dayanım ve sertlik beklentilerinden ödün vermeden ağırlık tasarrufu ve enerji verimliliğini mümkün kılacak malzemelerin geliştirilmesi çalışmaları hız kazanmıştır [4]. İstenilen bu özelliklerin klasik malzemelerle elde edilemeyeceği açıktır.

Yapılan teknolojik çalışmalar ile bir yandan metalik fonksiyonel yapılar geliştirilirken diğer yandan tekstil takviyeli kompozitlerin (TTK) kullanım alanlarının arttırılması amaçlanmıştır [5].

Tüm bu gelişmeler dünyada TTK için muazzam bir pazar potansiyeli oluşturmuştur. TTK sayesinde malzemelerin dayanım ve güvenliklerinden ödün vermeden ağırlık tasarrufu ve enerji verimliliği mümkün hale gelmiştir. Özellikle uzay ve havacılık endüstrisinde TTK önemli yer bulmuşlardır ve önemleri gün geçtikçe daha da artmaktadır. Otomobil endüstrisinde maliyet faktörü sınırlayıcı olsa da TTK önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle de alternatif enerji kaynakları kullanan yeni nesil kara taşıtlarında büyük ölçüde TTK kullanımı söz konusudur.

TTK güçlendirici elyaf ve bunu saran matris elementten oluşur. Güçlendirici elyaf olarak genelde yüksek mukavemetli elyaf olarak bilinen cam (GF), aramid (AF) ve karbon (CF) gibi elyaflar kullanılır. Matrisler duroplastik ve termoplastik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Termoplastik matrisler başta Polyamid (PA), Polypropylen (PP) Polyetheretherketon (PEEK) ve Poliester (PET) olmak üzere büyük öneme sahiptirler. En yaygın kullanılan örneği Epoksi olan duroplastik matrislere göre termoplastik matrisler aşağıdaki üstünlüklere sahiptirler [6].

- Yüksek darbe ve kırılma dayanımı
- Kısa proses süresi (duroplastik matrislerde 0,5-4 saat arası, termoplastiklerde 5 dk’dan az)
- Yüksek hacimli üretim imkanı
- Geri dönüşüm imkanı
- Şekillendirilebilme kolaylığı



Şekil 1. Hafif yapıların, enerji ihtiyacının giderilmesi çalışmalarındaki yeri

Duroplastik matrisli yapılarda kimyasal reaksiyon için uzun süreler gereklidir. Uzun işlem süreleri seri üretim önünde en büyük engel olmuştur. Termoplastik matrisli yapılarda ise kimyasal reaksiyona gerek yoktur. Bu bir yandan proses sürelerini kısaltırken diğer yandan proseslerin otomasyonunu sağlamıştır. Bu da seri üretimin gerçekleşmesinde ve üretim maliyetlerinin düşmesinde önemli bir etken olmuştur. Birçok yönden üstün özelliklerinin yanında, termoplastik matrisler aşağıdaki dezavantajlara sahiptir [7].

- Yüksek erime viskozitesi, emdirme problemi
- Sünme, (yüksek sıcaklıkta)
- Düşük ısıl dayanımı
- Düşük basma dayanımı ve sertlik
- Molekül yapısı nedeniyle nem alabilme tehlikesi

TTK'e uygulanan yükler güçlendirici elyaf tarafından taşınır. Matrisin ana görevi yükleri elyafa ve bir elyaftan diğer elyafa iletmektir. Ayrıca elyafları dış ortamdan korumakta matrislerin görevidir [6]. Bu nedenle matrislerin düzgün emdirilmesi elde edilecek yapının kalitesi için büyük önem arz etmektedir. Termoplastiklerin yüksek erime viskozitesi (500-500 Pa.s) emdirme işleminde duroplastiklere göre (15-100 Pa.s) homojen emdirilmelerini zorlaştırmaktadır [8].

Bu durum çalışma şartlarını zorlaştırdığından maliyetleri artırırken seri üretim yapılacak makinelerde ve aksamalarda teknolojik sorunlara yol açmaktadır. Ayrıca uygulamada kompozitin yapısındaki elyaf oranının %30'un üstüne çıkmasını engellemektedir. Elyaf oranı, kompozit fiziksel özellikleri ve mekanik tasarımı açısından son derece önemli bir parametredir [7].

2. HİBRİT KOMPOZİT YAPILAR

Termoplastik matrisli kompozitlerin üretiminde karşılaşılan bu problemlerin çözümü için termoplastik matris ve güçlendirici elyafın katı halde bir araya getirilmesi ile hibrit yapıların geliştirmesi böylece matrisin güçlendirici elyafa mümkün olduğu en yakın pozisyonda tutulması fikri geliştirilmiştir. Hibrit yapılardan elde edilen yarı mamule (preform) basınç altında ısıl işlem (konsolidasyon) uygulanmaktadır. Konsolidasyon işlemi ile birlikte matris elyaflar

arasında homojen dağılır ve akışkanın alması gereken yol az olacağından elyafların tam ıslatılması sağlanır. Bu da işlem süresini kısaltırken emdirme derecesinin yükselmesini sağlamaktadır [8].

Güçlendirici elyaf ve termoplastik matrisin katı halde karıştırılabilmesi için farklı prosesler geliştirilmiştir. Termoplastik matris farklı prosesler ile çözelti, eriyik, folyo veya toz halinde güçlendirici elyafın yapısına katılmakta ve bir takım son işlemlerle kompozit yapı elde edilebilmektedir. Fakat bu yöntemlerle üretilen malzemeler, dökümlülük ve bükülebilirlik gibi tipik tekstil özelliklerini kaybedecektir [9].

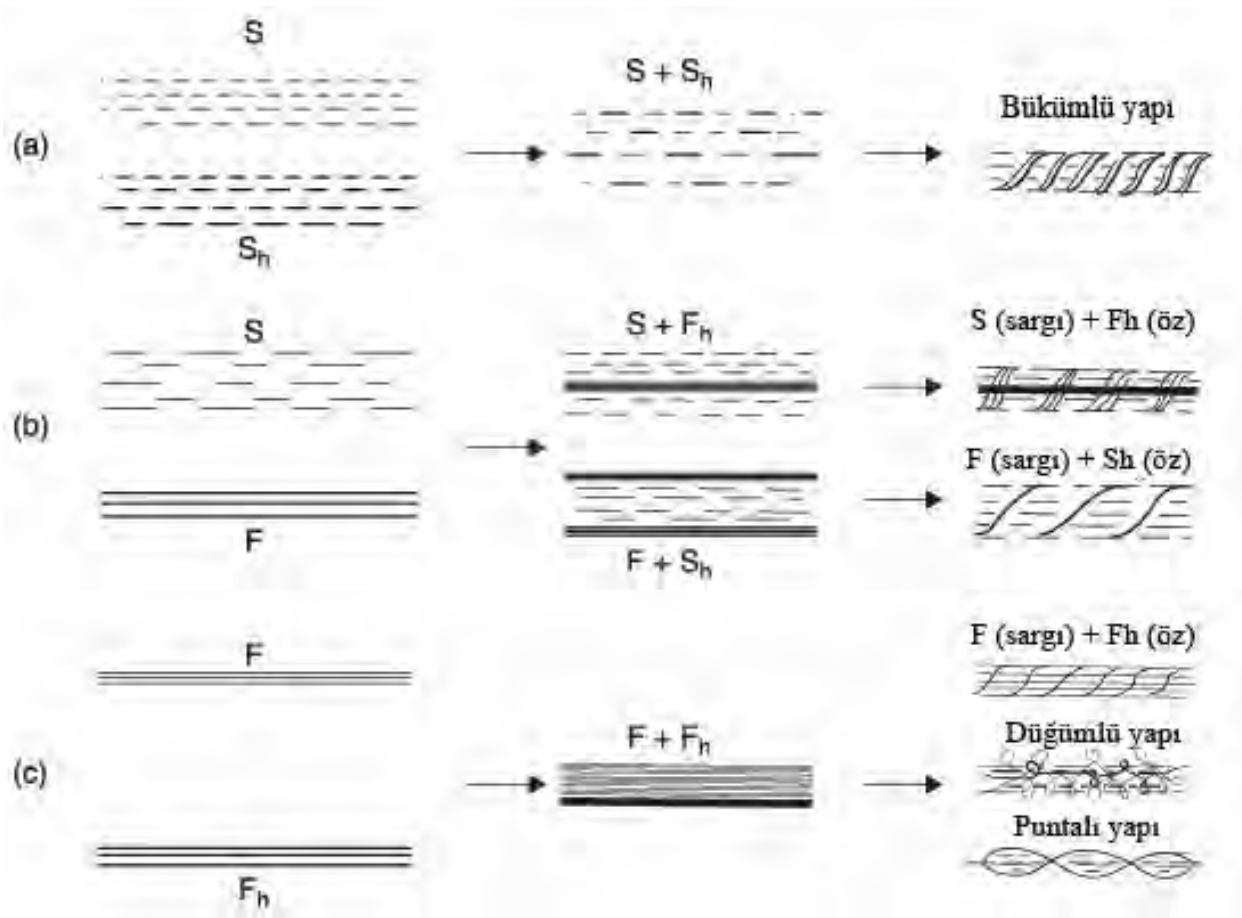
Klasik tekstil yüzeyi üretme yöntemleri (dokuma, örme vb.) kullanılarak güçlendirici ve termoplastik ipliklerin tekstil yüzeyine katılması mümkün olabilmektedir. Fakat bu bile homojen bir ıslatma için gerekli olan matrisin alacağı yolu yeterli derecede kısaltmaya yetmeyecektir. Bunun için güçlendirici ve matris elemanının iplik yapısında filamentlerin birlikte bükülmesi, eğrilmesi veya sarılması gibi işlemler (Şekil 2) yoluyla karıştırılması yararlı görülmüştür [10].

3. HİBRİT İPLİK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

İki veya daha fazla elyafın bir araya getirilmesiyle elde edilen iplikler, hibrit iplik olarak tanımlanmaktadır. Güçlendirici ve termoplastik elyafların bir araya getirilmesi hibrit ipliklere güzel bir örnektir.

Hibrit ipliklerin yapısında yüksek mukavemetli (GF, CF, AF vb.) elyaflar, iletken, elastomerik, doğal veya sentetik elyaflar, nihai ürünün kullanım amacına göre bir araya getirilebilmektedir. Hibrit iplikler, bir araya getirilen bileşenlerin yapı ve özelliklerine göre 3 farklı şekilde oluşturulabilmektedir.

- Kesikli (matris) ve yüksek mukavemetli kesikli (güçlendirici) elyafların bir araya getirilmesiyle
- Kesikli (matris veya güçlendirici) ve filament (matris veya güçlendirici) elyafların bir araya getirilmesiyle
- Filament (matris) ve filament (güçlendirici) elyafların bir araya getirilmesiyle



S = kesikli (stapel) F = Filament S_h, F_h = Yüksek performanslı elyaflar

Şekil 2. Temel hibrit yapıları [11]

Farklı termoplastik matris ve güçlendirici bileşenler içeren hibrit ipliklerin üretimi için birçok üretim tekniği geliştirilmiş, patent alınmış ve bilimsel çalışma yürütülmüştür. Hibrit ipliğin yapısı, bu iplikten üretilecek termoplastik kompozitin özellikleri üzerinde önemli rol oynamaktadır. Matris bileşeninin güçlendirici elyafı düzgün bir şekilde sarıp mekanik etkilere karşı korunması istenmektedir. Aynı zamanda kompozit yapısındaki bileşenlerinin homojen bir şekilde dağılım gösterilmesi ve fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi adına güçlendirici elyaf oranının yüksek olması temel hedefler arasındadır. Bu bölümde termoplastik kompozitler için hibrit iplik elde edilmesinde kullanılan teknikler hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. Ring eğirme

Klasik ring makinesinde küçük modifikasyonla ve yatırımla hibrit iplik üretimi mümkün olabilmektedir. Makinede bulunan fitil çağlığına ek bir çağlık ekleyerek filament ipliğin düzgün gerilim ve pozisyonda sağılması sağlanmaktadır [12].

Çağlık kısmından beslenen filament çekim sisteminin çıkış silindirin kıştırma noktasında termoplastik liflerden eğrilmiş fitil ile birleşmektedir. Beraber eğrilen bileşenler hibrit iplik olarak kopsa sarılırlar. Güçlendirici filament ile termoplastik elyaf arasında adezyon kuvvetinin artırılması için klasik ring ipliklerine göre daha fazla büküm verilmektedir. Bu da üretim hızını ve iplik mukavemetini düşürmektedir [13].

3.2. Open-End Rotor Eğirme

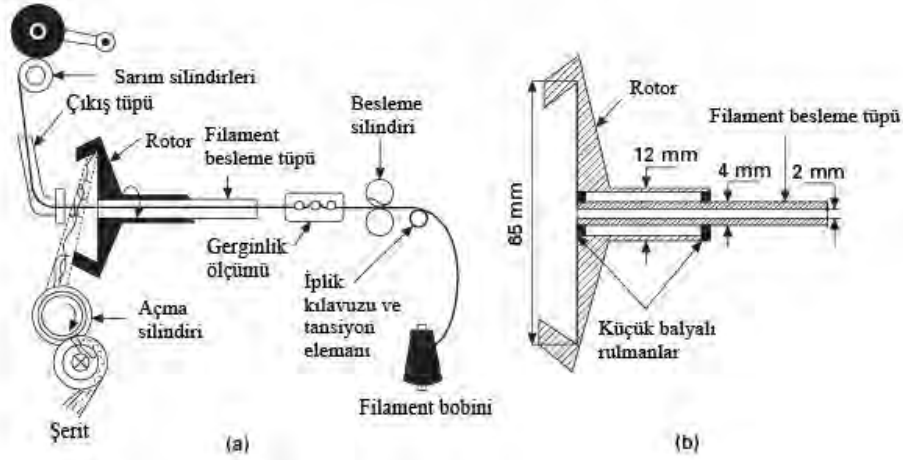
Ring iplik eğirme işlemi ile karşılaştırıldığında yüksek iplik çıkış hızı, düşük üretim maliyeti ve daha hacimli iplik yapısı sayesinde Open-end rotor eğirmeciliği kullanımı tüm dünyada hızla artmıştır [14, 15]. Düşük mukavemet ve yüzeyde bulunan sarmal lifler gibi dezavantajların ortadan kaldırılması için rotor eğirme işleminde kesikli elyafın çekirdeğine filament iplik yerleştirmek suretiyle özlü rotor ipliği geliştirme çalışmaları yürütülmüştür.

Cheng ve Murray [17] geliştirdikleri modifiye rotorla pamuk lifleriyle sarılı ve çekirdeğinde tekstüre PET filament ipliği bulunan özlü iplik elde etmişlerdir. Pouresfandiari ve ark. [16] farklı bir mekanizma geliştirerek farklı yapılar da özlü iplik geliştirmişlerdir. Şekil 3'de görüldüğü gibi rotorun ortasında bulunan besleme tüpünden alınan filament iplik kesikli

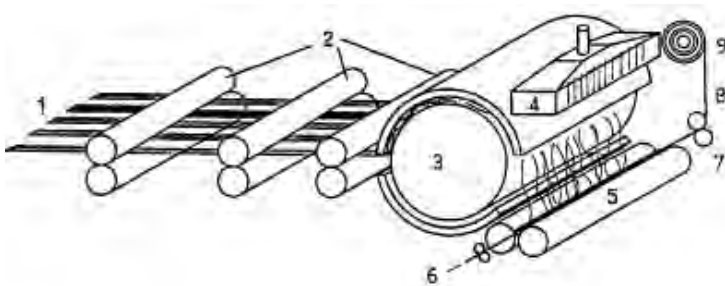
liflerden oluşmuş şeritle bir araya getirilmektedir. Pamuk lifleri tarafından sarılı, farklı oranlarda beslenmiş PET filament iplikten oluşan hibrit iplikler elde edilebilmektedir. Bu teknikle elde edilen hibrit ipliklerin ortak problemi, termoplastik kompozitlerde pek de istenmeyen düzgünsüzlük sorunudur.

3.3. Friksiyon eğirme (DREF eğirme)

Open-end (açık uç) prensibi ile çalışan friksiyonlu iplik eğirme işleminde birden fazla şeritten besleme yapılır ve açma ünitesinden ayrık lif haline gelinceye kadar açılır. Tek lif haline gelmiş liflerin açma silindirlerinden ayrılması merkezkaç kuvveti sayesinde gerçekleşir. Hava akımı vasıtasıyla eğirme bölgesine iletilen lifler aynı yönde dönen bu eğirme silindirlerinin üst yüzeyinde mekanik bir yuvarlanma hareketi ile büküm alırlar [18].



Şekil 3. (a) Eğirme prensibinin şematik gösterimi (b) modifiye edilmiş rotor [16]



Şekil 4. Dref-3 friksiyon eğirme metodunun şematik gösterimi [19]

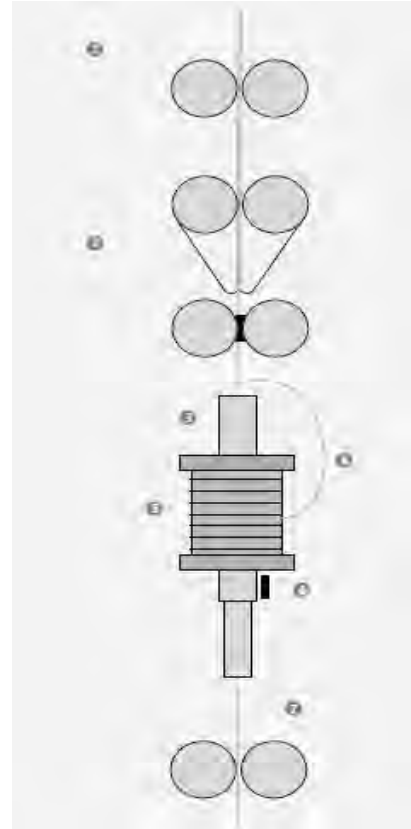
Dr. Ernst Fehrer tarafından 1973 yılında geliştirilen makinelerde elyaf açılması ve için hem açma silindirleri (DREF 2) hem de bir çekme ünitesi (DREF 3) kullanılmaktadır. Eğirme işlemi istenen özellikte özlü iplik üretilmesine imkan vermektedir. Merkezde bulunan öz filament (GF, AF, CF, Metal vb.) kesikli elyaflar (AF, PA, PP vb.) tarafından sarılabilmektedir. İki ve daha fazla öz filament beslenebilmekte, şerit halinde beslenen kesikli elyaflar farklı karışımlardan oluşabilmektedir. Üretilecek hibrit ipliğin özelliklerine göre de farklı friksiyon makineleri (Dref 2, Dref 3, Dref 2000, Dref 3000) kullanılarak üretim yapılabilir. [20]. Bütün bunlar göz önüne alındığında friksiyon eğirme tekniği kullanılarak çok farklı yapılarda farklı uygulama alanları için hibrit iplikler elde edilebilmektedir.

Friksiyon iplik üretim sisteminde hibrit iplik yapısında kırılabilir yapıda olabilen güçlendirici elyafı dışarıdan saran matris materyal tarafından korunmakta bu da hibrit ipliklerin çalışması esnasında kolaylık sağlamaktadır. İplik kesitinde homojen dağılımın olmaması TTK malzemenin konsolidasyon işlemi sırasında homojen emdirme işlemi zorlaştırmaktadır. [21]

3.4. Sarmal (Wrap) İplikçilik

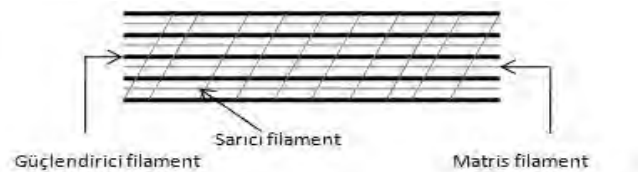
Birçok üretici firma tarafından piyasaya farklı isimler altında sistem sunulmuşsa da genel olarak sarmal (wrap) iplik, iplik merkezinde bükümsüz kesikli elyaf ve merkezin etrafına sarılmış filament ipliğinden oluşmaktadır. Şekil 5'te gösterildiği gibi fitil ya da şerit (1) uç, dört ya da beş silindirik çekim düzeneğinde çekime tabi tutulur. Çıkan elyaf demeti gerçek büküm verilmeden oyuk iğe (3) sevk edilir. Demet dağılmadan belirli bir mukavemet kazandırmak için elyaf demeti çekim düzeneğinden çıkar çıkmaz bir filament iplikle (4) sarılır. Sürekli filament ipliği oyuk iğe monte edilmiş hızla dönen küçük bobinden (5) sağlanır. Çıkış silindirleri sarmal ipliğin üretilen sarmal ipliği sarım tertibatına yönlendirir [18].

Abbott ve Freischmidt [22] yaptıkları çalışmalarla bu teknikte küçük değişiklikler yaparak hibrit iplik elde edilmesinde kullanılmışlardır. Elde edilen iplik yapısındaki matris ve güçlendirici bileşenler filament formundadırlar.



Şekil 5. Sarmal iplik eğirme tekniğinin şematik gösterimi [18]

Güçlendirici filamentler Şekil 6'da gösterildiği gibi matris filamentler tarafından sarılmıştır. Sarım iplikleri matris filament olabilecekleri gibi herhangi ince bir filament de olabilmektedir. Matris filament olduğu durumda konsolidasyon işlemi bu filamentlerin erimesi ile birlikte termoplastik kompozitin yapısına katılırlar aksi durumda filamentler olduğu gibi kalacaktır. Dikkat edilecek husus, sarılan ipliğin güçlendirici ve matris filamentlerin yüzeyini önemli bir seviyede etkilememesi için ince olması gereğidir [23].



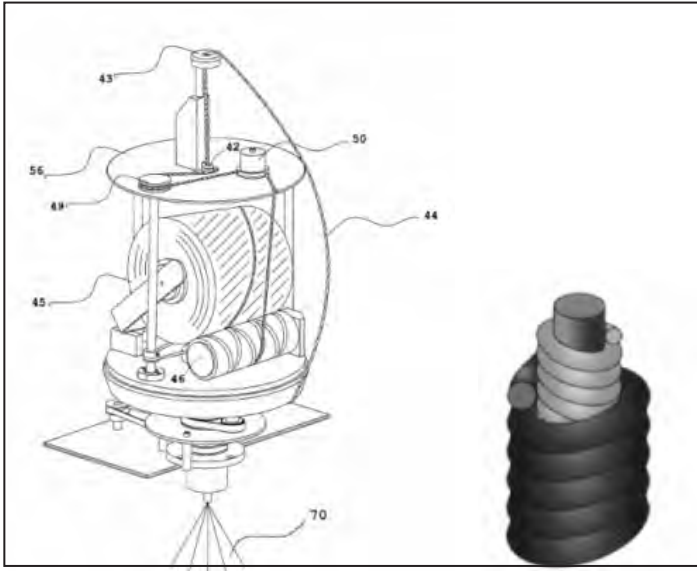
Şekil 6. Sarmal eğirme ile elde edilmiş hibrit iplik yapısı

Bu şekilde güçlendirici filamentler dokuma, örme vb. gibi işlemlerden korunmakta fakat konsolidasyon işleminde düzgün emdirme yapılmasını engellemekte ve daha yüksek sıcaklık ve basınç derecelerine yükseltilmesi gerekmektedir [24].

3.5. Katlamalı büküm

Katlamalı büküm, iplik yapısındaki tüm tekstil ürünlerinin mukavemetini arttırmak, düzgünlükleri azaltmak yada fantezi efekt elde etmek için yan yana getirilerek istenen yönde bükülerek birleştirilmesini ifade etmektedir [25].

Katlamalı büküm tekniği ile hibrit iplik geliştirme çalışmalarında en sık kullanılan makinelerden biri Agteks firmasına ait Direct-Twist cihazıdır (Şekil 7 (a)). Tek ve çift katlı katlamalı büküm imkanı bulunan cihaza beslenen birden çok sayıda ipliğin büküm hızı ve bükümlü ipliğin sarım hızı bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir [26].



3.6. Tow kırma

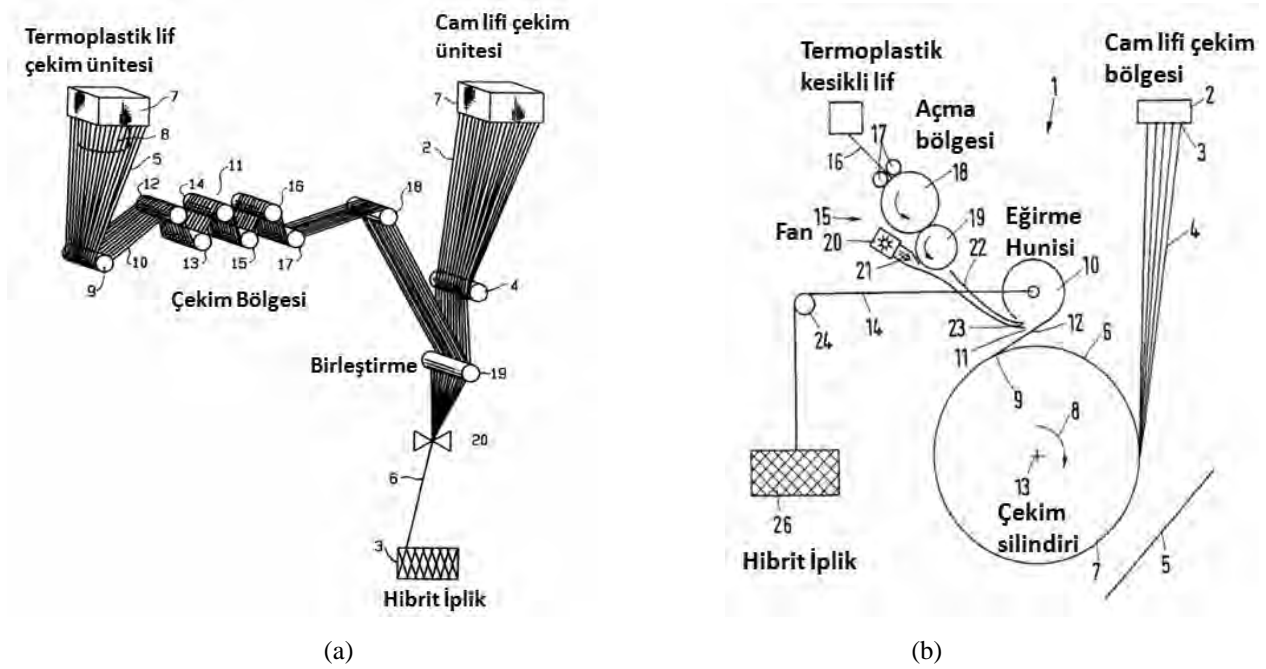
Akrilik liflerinin üretilmesinde yaygın olarak kullanılan tow kırma işlemi kullanılarak GF ve CF gibi güçlendirici elyaflar tow veya filament halindeki termoplastik matrisle gergin durumda, rastgele bir şekilde karıştırılmakta, böylece hibrit iplikler elde edilebilmektedir. Bu teknik kullanılarak elde edilen hibrit iplik üretim işlemlerinde temel olarak Şekil 9'de gösterildiği gibi iki veya daha fazla iplik, birlikte tow kırma bölgesine beslenmektedir. Burada bir çift kıştırma silindiri (veya çubuğu) arasından geçirilerek uzun stapel elyaf haline getirilirler ve çekilerek elyaf şeridi haline getirilirler [28, 29]. Tow kırma işleminde belirlenen uzunluk değerinde kesilen güçlendirici ve matris filamentler birlikte bükülerek iplik elde edilir [30].

Verilen büküm ipliğin esnekliğini ve elastikiyetini artırmakla beraber liflerin iplik kesitinde düzgün bir şekilde yerleşmemiş olması nedeniyle uzunluk yönündeki sertlik ve mukavemet değerleri azalmaktadır. Fakat elyaf uzunluğu kritik lif uzunluğundan daha yüksektir ve düzgünlük değeri de kompozitin tabakalar arası bağlantı özelliklerini geliştirebilmektedir [31].

3.7. Online filament çekimi

İlk olarak Fransız Vertrotex firması (OCV™ Reinforcement firması tarafından alınmıştır) tarafından geliştirilen Cam lifi/PP hibrit iplik üretim yöntemi olan Twintex yönteminde (Şekil 8(a)) GF ve PP eriyikten çekme işleminden hemen sonra bir araya getirilebilmektedir [32]. Bu üretim tekniğinde ayrıca bir hibrit iplik üretim prosesine ihtiyaç duyulmadığından cam liflerinin fiziksel özelliklerinin zarar görülmesi engellenmektedir. Ayrıca bu teknik üretim maliyetlerini düşürmektedir. Twintex'e benzer bir üretim tekniği de Alman Schüller firması tarafından geliştirilmiştir. Bu teknikte (Şekil 8(a)) eriyikten gelen cam lifi kesikli termoplastik liflerle bir araya getirilerek eğirme hunisi yardımıyla hibrit iplik üretilmektedir [33].

Bu sayede dışta bulunan iplik, içteki ipliği belirlenen yönde dönerek sararken gerekli ayarlamalarla içteki iplik bükümsüz bırakılabilmektedir. Çekirdekte güçlendirici filamentin onu saracak tek katlı veya çift katlı termoplastik matris iplik tarafından sarılmasıyla hibrit iplik elde edilebilecektir. Metre başına verilen büküm arttıkça çekirdekte bulunan güçlendirici filament, sargı ipliği tarafından daha yoğun sarılmaktadır. Böylece termoplastik kompozitlerde de amaçlandığı gibi güçlendirici filamentler mekanik etkilerden korunabilmektedir.

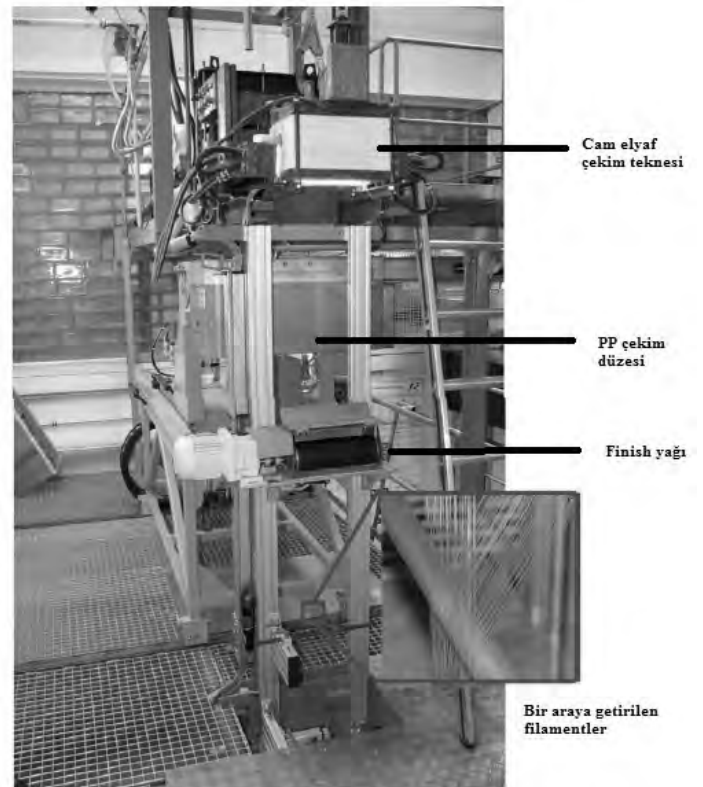


Şekil 8. Direkt cam lifi çekilerek üretilen hibrit iplikler (a) Vetrotex France S. A. [32] (b) Schüller firması [33]

Hava jetli tekstüre ile üretilen hibrit ipliklere kıyasla yüksek yatırım maliyeti, sınırlı üretim yelpazesi ve esnekliği yanında;

- Cam liflerinin üretim sırasında zarar görmemesi sayesinde daha iyi mekanik özelliklere sahip iplik üretilmesi
- Filament bileşenlerinin homojen karışması
- Termal büzülme görülmemesi
- Proses aşamalarının azalması ile daha yüksek üretim imkânına sahip olması gibi avantajlara sahiptir [9].

Her ne kadar sadece GF/PP and GF/PET gibi GF elyafının güçlendirici filament olarak kullanıldığı hibrit ipliklerin üretilmesine müsait olsa da [34] termoplastik ve güçlendirici bileşenler çok düşük üretim hasarı ile üretilmekte ve son derece homojen şekilde karışım sağlanmaktadır [35-37]. Yapılan çalışmalara göre 52 % GF und 48 % PP karışımı en iyi mekanik özelliği ve en uygun proses şartlarını sağlamaktadır [38].



Şekil 9. GF/PP online hibrit iplik üretimi [39]

Mäder ve ark. [35-37] çalışmalarında cam elyafının PA ve PET gibi diğer termoplastik kompozitlerle karıştırılmasına ve bu karışımlarda güçlendirici elyaf oranını arttırma ve filament inceliğini azaltma konusuna yoğunlaşmaktadırlar. Bunu da güçlendirici filamentin sarım hızı ve debisi belirlemektedir. Termoplastik matris için de (örn: PP) değişik delik sayılı ve geometriye düzeler geliştirilmiştir. Böylece PP'nin filament sayısı, yüzey özellikleri ve kesit alanı değiştirilebilmektedir. Proses şartları optimize edilmeye çalışılmaktadır. Bu teknikle ilgili devam eden araştırmalar hibrit iplik üretim potansiyelini arttırmaya yoğunlaşmaktadır.

3.8. Hava jeti ile tekstüre ve puntalama

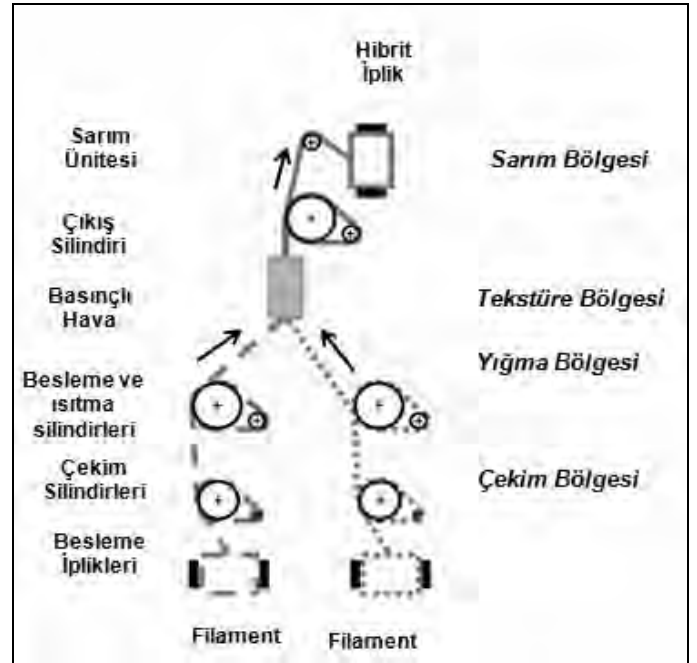
Hava jetli tekstüre ve puntalama işlemlerinde hava sisteminin oluşturduğu süpersonik, türbülanslı hava akışı tarafından düz, sürekli, sentetik filamentler (POY), karmaşık, dolaşık, hacimli kesikli liflerden eğrilmiş ipliklere benzer bir yapıya dönüştürülür. Hava kısmının kısmen azaldığı bölgelerde filamentler birbirine sarılır ve karmaşık bir yapı oluştururlar. Dolayısıyla filamentlerin birbirlerine tutunmaları ve böylece kohezyon kuvvetinin oluşması sağlanır, aynı zamanda ipliğe hacimli bir yapı kazandırılır [40-41].

Her ne kadar PET, PA ve PP gibi termoplastik filamentler bugüne kadar hava jeti tekstüre işleminde en yaygın olarak kullanılan iplikleri olmuş ise de GF, CF gibi güçlendirici filamentler ve bunların özellikle de termoplastik filamentlerle kombinasyonları rahatlıkla tekstüre edilebilmektedir. Bunun için bu filamentlere uygun olarak tasarlanarak imal edilmiş veya modifiye edilmiş hava jetli tekstüre makineleri uygun tekstüre jetleri ile donatılabilmektedir. Son yıllarda puntalama işlemi daha çok, farklı ipliklerin (filament iplik/elastan, güçlendirici filament/ termoplastik filament) puntalama jetleri ile harmanlanması alanlarında yoğunlaşmaktadır [9, 40]

İki veya daha fazla ipliğin birbiriyle hava jetli tekstüre veya puntalama yöntemleri kullanılarak bir araya getirilmesiyle elde edilen ve commingling (commingle-karıştırmak fiilinden türetilmiş) olarak da adlandırılan hibrit iplik üretim yönteminde bileşenler çok yüksek homojenlikte karıştırılabilmektedir.

Bu hibrit iplik üretim yönteminde hava tekstüre jeti içerisinde geçen düz sürekli filamentler basınçlı

havanın yardımıyla açılır ve tekrar dağıtılır. Karıştırılacak bileşenler (güçlendirici ve termoplastik filamentler) birbirinden ayrı ve bağımsız bir şekilde ayarlanabilen besleme silindirlerinden (Şekil 10) geçerek tekstüre jetine beraber girmektedir. Bileşenler basınçlı sıcak veya soğuk hava yardımıyla açılmakta ve hava akımı içinde birbiri içerisinde karışmaktadır. Güçlendirici ve matris filamentler özel dizayn edilmiş hava tekstüre jetinden geçerken, çekilme hızından daha fazla beslenir ve bu esnada ortama gönderilen sıkıştırılmış hava tesiri ile filamentler yüksek seviyede bir hızla alabora edilir. Mümkün olan en kapalı, homojen iplik yapısı hedeflenmektedir [9].



Şekil 10. GF ve PP filamentlerinden hibrit iplik üretim prensibi [9]

Commingling işlemi ile eğrilebilen tüm güçlendirici elyaflar ve eğrilebilen polimer yapıları elyafların çoğu kombine edilebilir [42]. Temel tekstil uygulamalarında commingling ipliklerin rahatça çalışabilmesi, bu hibrit ipliklerin önemli bir avantajıdır. Tekstil yapılarında yaşanan gelişmelerle birlikte commingling ipliklerin kullanımı sayesinde termoplastik takviyeli kompozit parçaların mekanik özellikleri geliştirilmiştir [43].

Yapılan araştırmalar sonucunda, eşit proses şartlarında GF/PP ipliklerin en az düğümlenme ve en düşük puntalama derecesi gösterdiği anlaşılmıştır [44]. Bu

yüzden de sonraki çalışmalar da bu konuya yoğunlaşmıştır [45, 46].

Bu iplikler ComfilR-G ve ComfilR-C (Comfil ApS) ticari adları altında GF, AF, CF ve HTPET liflerinin farklı termoplastik lifler ile kombinasyonları halinde piyasaya sunulmaktadır [47].

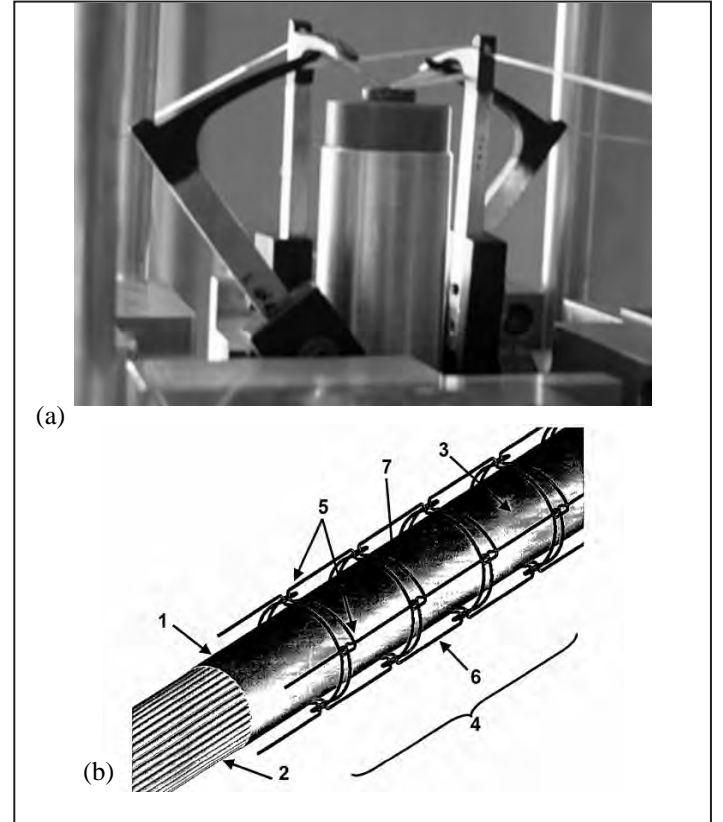
3.9. Kemafil Teknolojisi

Kemafil teknolojisi Saksonya Tekstil Araştırma Enstitüsü (STFI) tarafından Almanya'nın Chemnitz şehrinde geliştirilmiştir. Şekil 11 (b)'de gösterildiği gibi Kemafil tekniği merkezde filament, elyaf şeriti, eğirme iplik gibi yapılar halinde çekirdek (2) ve bunu uzunluğu boyunca saran ilmekli bir kabuktan (4) oluşur. Kemafil makineleri yuvarlak örme prensibine göre çalışırlar ve saç örgü şeklinde tüp yapı üretirler. Çekirdek kısmına çok farklı yapılarda materyal beslenebilme imkanı olması son derece geniş bir üretim yelpazesi sağlamaktadır. Bu teknikle elde edilen hibrit iplik yapısında paralel bir şekilde dizilmiş matris filamentler gene paralel dizilmiş güçlendirici filamentlerle çevrilebilmektedir. Çekirdekte bulunan bu bileşenler matris örülmüş kabuk tarafından sarılmıştır. Örme kabuk elde edilmesinde kullanılan filamentler çekirdekte kullanılan matris bileşen ile aynı veya farklı polimer yapıda olabilmektedir [24, 48].

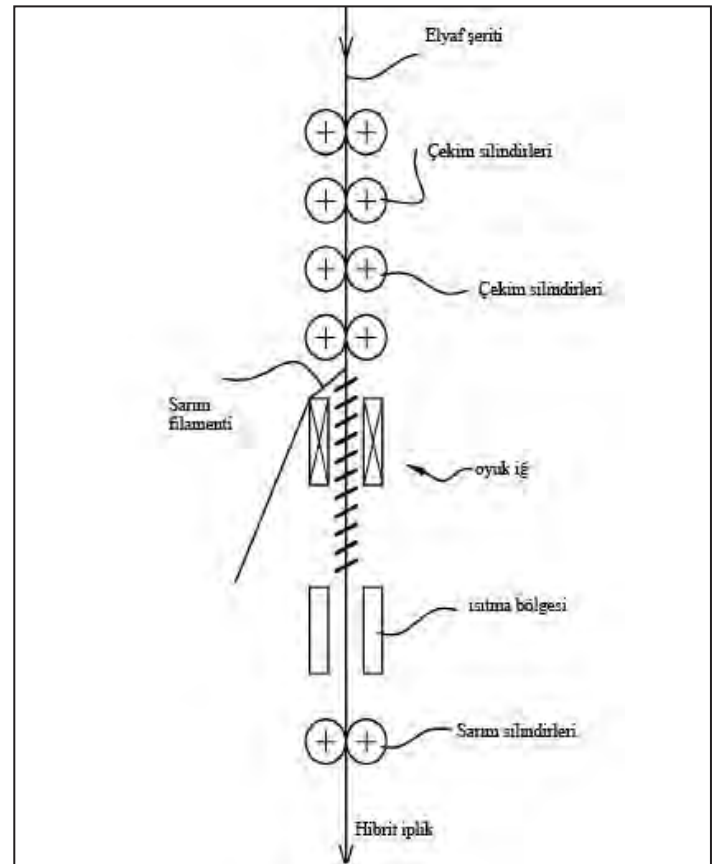
3.10. Schappe Teknolojisi

Schappe (şap) teknolojisi 19. yüzyıl sonlarında ipek iplikçiliği için geliştirilmiştir. Son yüzyılda yapay lif üretim teknolojilerinin geliştirilmesi ile beraber kesikli sentetik lif elde edilmesi mümkün olmuştur. Günümüzde Schappe teknolojisi kullanılarak endüstriyel ürünlerde kullanılmak üzere teknik iplikler elde edilebilmektedir. Bu teknik (Şekil 12) uzun stapel kesilmiş sentetik liflerden hacimli ve sıkı yapıda iplikler üretilmesi esasına dayanmaktadır [50]. Önceki bölümde anlatılan tow kırma işlemi (bkz. 3.6.) bu tekniğin ilk adımını oluşturmaktadır.

Schappe teknolojisi kullanılarak birçok güçlendirici (AF, CF, Metal filament, PBO) ve termoplastik (PA, PET) elyaflar tek başına veya harmanlanarak teknik iplikler elde edilebilmektedir [50].



Şekil 11. (a) Kemafil teknolojisi [49] (b) Kemafil iplik yapısı [48]



Şekil 12. Schappe teknolojisinin şematik gösterimi [51]

Tow kırma işlemi ile elde edilen hibrit elyaf şeriti çekme bölgesinde inceltmekte ve çok ince bir filament iplikle sarılmaktadır (Şekil 13). Sarım için kullanılan filament iplik ile hibrit şerit yapısında bulunan termoplastik elyaf aynı polimer yapısında olabilmektedir. Sarılan filament, malzeme içinde ağırlıkça çok az bir orana sahip olsa da liflere dışarıdan baskı uygulayarak bir arada tutmakta, bununla da iplik mukavemetini sağlamaktadır [9].



Şekil 13. Schappe iplik yapısı [9]

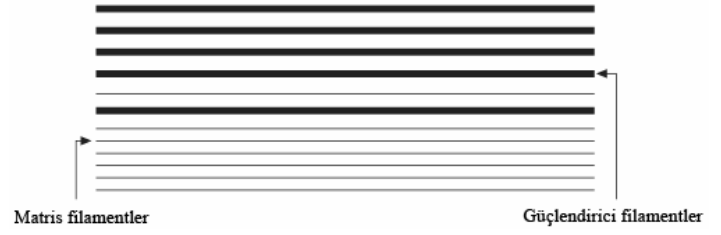
Sarmal eğirme tekniğiyle, homojen bir şekilde karıştırılmış güçlendirici ve matris kesikli liflerinden oluşan hibrit elyaf şeriti inceltilerek çok ince sargı lifleri tarafından sarılmasıyla hibrit iplikler elde edilebilmektedir. Sargı filamentleri kesikli termoplastik elyafın filament hali olup 20-300 tur/m sarılmaktadır. Filament ağırlık olarak düşük bir oranda olsa da dışarıdan ipliği sararak iplik yapısını bir arada tutan mukavemeti sağlamaktadır. İplik daha düşük paket yoğunluğuna sahip olmakta ve mukavemet değerleri ring ipliklerinden daha düşük olmaktadır. [9]

Filamentin elyaf şeriti etrafına sarılması oyuk iğ eğirme prensibine göre gerçekleşmektedir. Schappe firmasının geliştirdiği işlemde sarım silindirlerinden önce bir miktar ısıtma yapılarak ön konsolide olmuş hibrit iplik elde edilmektedir [51].

3.11. Paralel sarma

Bu teknikte, üretilen hibrit ipliği oluşturan güçlendirici ve termoplastik bileşenler herhangi bir şekilde birbirine karışmadan üst üste getirilmektedirler (Şekil 14).

Bileşenlerin bir araya getirilmesinden sonra ısıtma ve konsolidasyon işlemi ile de kompozit üretimi tek aşamada gerçekleşebilmektedir. Buna göre çağlıklardan çekilen iplikler bir araya getirildikten sonra bir ön ısıtma bölgesinden geçirilmekte ve basınçlı silindirler arasında termoplastik matrisin erime noktasının üstünde bir sıcaklığa çıkarılmaktadır.



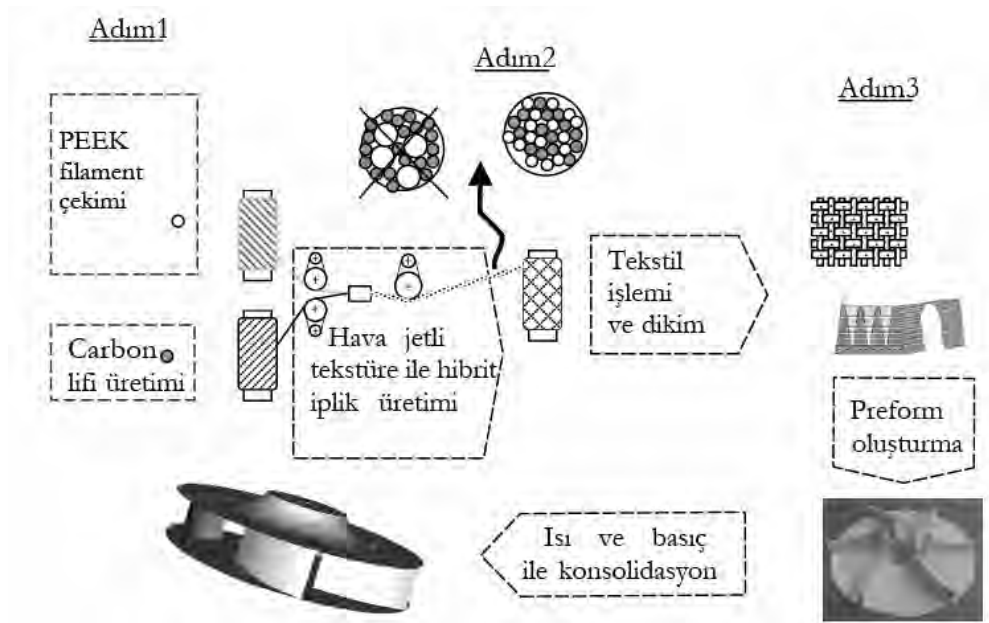
Şekil 14. Paralel sarma tekniğinde hibrit iplik yapısı

4. HİBRİT İPLİKLERİN KARAKTERİZASYONU

Termoplastik kompozitler, havacılık, otomotiv, makine, inşaat, enerji, denizcilik gibi endüstrilerde kullanım alanına sahiptirler. Bu malzemelerden kullanım alanına göre sertlik, tokluk, esneklik, hafiflik, çevre şartlarına dayanıklılık, darbe dayanımı, sertlik gibi günlük yaşamda kullanılan terimlerle ifade edilen özellikler yanında daha bilimsel dille ısıl genişleme katsayıları, yorulma, çatlama ve kırılma, çekme, eğme dayanımları ve benzeri termal ve mekanik özellikler aranmaktadır. Hibrit iplikler dokuma, atkılı ve çözgülü örme, saç örgü vb. tekstil işlemleri ile preform haline getirilirler (Şekil 15). Preformun yapısında bulunan hibrit iplikler, preformun dökümlülük, geçirgenlik ve incelik gibi özelliklerine önemli derecede etki ederler. Neticede preformdan elde edilecek kompozit açısından bu özellikler oldukça önemlidir.

Bu bölümde farklı üretim teknikleriyle elde edilen hibrit ipliklerin üretim teknikleri ve iplik yapısını karşılaştırılması verilecektir. Üretilen hibrit ipliğin yapısını ve özelliklerini etkileyen değişkenler; hammadde özellikleri ve hibrit iplik üretim tekniği ve parametreleri olmak üzere iki ana başlıkta toplanabilir.

Tablo 1'de farklı hibrit iplik üretim yöntemleri kullanılarak elde edilen ipliklerin özellikleri ve iplik yapısının kesit şekilleri verilmiştir. Tablodan da görüleceği gibi, her hibrit iplik üretim teknolojisinin kendine göre avantaj ve dezavantajları olabilmektedir. Bu ipliklerden elde edilecek kompozit yapıdan istenen özelliğe göre hibrit iplik seçimi söz konusu olabilecektir. Bu nedenle hibrit ipliklerin yapısını, mekanik özelliklerini ve çeşitli tekstil veya kompozit oluşturma proseslerinde davranışlarını bilmek oldukça önemlidir.



Şekil 15. CF/PEEK hibrit ipliklerle termoplastik kompozit üretimi [52]

Tablo 1. Farklı hibrit iplik üretim yöntemleri ile elde edilen ipliklerin özellikleri ve iplik yapıları

| Üretim Yöntemi | Özellik | İplik Yapısı [9, 11, 55] |
|--------------------------------------|--|--------------------------|
| Paralel sarma (Side-by-side) | Basit proses, hibrit iplik oluşumunda filamentler zarar görmez, iki filament üst üste, gergin durumda, düzgün karışım yok | |
| Katlamalı büküm (Twisted) | Filamentler beraber bükülmüş, iplik kesitinde homojen olmayan karışım, gergin değil, bitmiş üründe daha iyi gerginlik, filament oryantasyonu kötü | |
| Ring iplik eğirme (Core Spun) | Gergin haldeki güçlendirici filament matris filament tarafından sarılı, iplik kesitinde homojen olmayan karışım | |
| Friksiyon eğirme (DREF) | Matris materyal kesikli elyaf halinde sarılı, iplik kesitinde karışım yok, gergin güçlendirici elyaf ipliğin merkezinde, kesitte homojen dağılım yok, yüksek eğilme dayanımı | |
| Hava Jeti ile tekstüre (Commingling) | Güçlendirici ve matris filamentler basınçlı havaya maruz bırakılmışlardır, yüksek homojenlikte karışım, iyi işlenebilirlik, düşük elyaf oryantasyonu, yüksek filament kırığı | |
| Online iplik üretimi (Twintex) | Bileşenler çekim işleminden sonra aynı bobine sarılır, Çok iyi karışım, incelik aralığı sınırlı, esnek olmayan üretim, sadece GF için üretim | |
| Schappe teknolojisi | Kesikli güçlendirici ve matris lifler, onları saran filament, Esnek iplik yapısı, yüksek emdirme kalitesi, iyi işleme kabiliyeti | |
| Tow Kırma (Strech Breaking) | Tow kırma işlemi ile kesikli hale getirilen termoplastik ve güçlendirici lifler düzgün bir şekilde yerleşmemiş, uzunluk yönündeki sertlik ve mukavemet değerleri düşük | |
| Kemafil teknolojisi | Çekirdekte paralel matris filamentler ve onları saran güçlendirici filament, bunları bir arada tutan örme yapı | |

4.1. Hammadde özellikleri

Hibrit ipliği oluşturan elyafların lineer yoğunluğu, numarası, enine kesit şekli, rijitliği ve sürtünme özellikleri, ipliğin rijitliğini ve işlenebilirliğini dolayısıyla da bundan elde edilecek kompozitin özelliklerini etkilemektedir. İnce liflerin kaba liflere göre daha esnek bir yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Acar ve ark.[53] eğilme ve burulma rijitliklerinin sırasıyla çap ve çapın karesinin fonksiyonu olan eylemsizlik momentleri ile orantılı olduğunu ifade etmişlerdir. Bu nedenle eylemsizlik momentleri daha küçük olduğundan ince filamentleri eğmek ya da bükme için gereken kuvvetler daha az olacaktır. Aynı çalışmada eliptik ve boşluklu (hollow) kesitli filamentlerin dolu, yuvarlak kesitli filamentlere göre daha iyi tekstüre olduğu belirtilmiştir.

Golzar ve ark. [54] çalışmalarında güçlendirici ve matris filamentlerin (CF/PEEK ve GF/PP) farklı inceliklerinin hibrit iplik yapısına ve bundan elde edilen kompozitlerin özelliklerine etkisini incelemiştir. Buna göre teorik çalışmalarda termoplastik matrisin güçlendirici filamentle aynı veya yakın incelikte olması beklenirken, termoplastik filamentlerin daha ince olmasının gerektiği belirtilmektedir.

Alagirusamy ve ark. [56] Glass/PP, Glass/PA, and Glass/PET hibrit ipliklerinin hava jetli tekstüre işlemi kullanılarak puntalanmasını inceledikleri çalışmalarında, GF/PP hibrit ipliklerin en az düğümlenme ve en düşük puntalama derecesi gösterdiği anlaşılmıştır.

4.2. Hibrit iplik yapısı ve fiziksel özellikleri

Hibrit ipliklerden elde edilen termoplastik kompozitlerde uygulanan yükler güçlendirici elyaf tarafından taşınır. Matrisin ana görevi yükleri bir elyaftan diğer elyafa iletmektir. Yüklerin iletimi güçlendirici ve mat-

ris bileşenlerin dış yüzeyinde gerçekleşir. Hibrit iplik yapısındaki bileşenlerin yüzey özellikleri kompozitin kesme dayanımının hesaplanmasında önemli etkidir. Ayrıca elyafları dış ortamdan korumak da matrislerin görevidir [6]. Bu nedenle manto/çekirdek yapısındaki hibrit ipliklerin (Friksiyon eğirme vb.) mukavemet değerlerinin daha yüksek olması beklenmektedir [21].

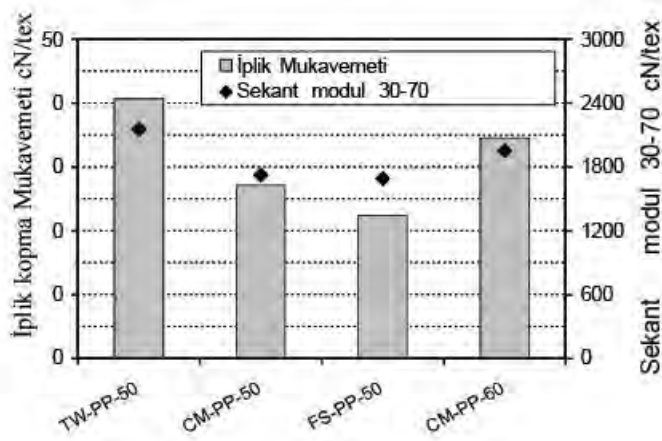
Choi ve ark. [57] çalışmalarında farklı teknolojilerle üretilen hibrit iplik yapılarını ve bunların kompozit yapısına etkilerini incelemiştir. Commingling (hava jetli tekstüre), Twintex (online çekim işlemi) ve Friksiyon eğirme teknikleri ile elde edilen GF/PP hibrit ipliklerini ve bunlardan elde edilen kompozitlerin mekanik özelliklerini değerlendirilmiştir (Tablo 2).

Güçlendirici elyaf oranı %50 (CM-PP-50) ve %60 (CM-PP-60) olan iki commingling hibrit ipliğin karşılaştırılabilirliği mümkün olmaktadır. Buna göre güçlendirici elyaf oranı %60 olan ipliğin, diğerine göre çekme dayanımının %28 daha yüksek olduğu görülmektedir. Böylece hibrit ipliğin mekanik özelliklerinde güçlendirici elyaf oranının rolünü gösterilmektedir.

Friksiyon eğirme tekniği ile elde edilen ipliklerin çekme dayanımları ve uzama miktarlarının commingling iplik ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu görülmektedir (Tablo 2). Buna da DREF eğirme işleminde düzgün bir üretim yapılamamasının neden olduğu belirtilmiştir. En yüksek mukavemet ve uzama değerleri Twintex ipliklerde elde edilmiştir. Bu hibrit iplik üretimi teknolojisinde bileşenlerin filament çekimi sırasında bir araya getirilmesi nedeniyle ikinci bir iplik oluşturma prosesine ihtiyaç duyulmamakta, böylece cam liflerinin üretim sırasında zarar görmemesi sayesinde daha iyi mekanik özelliklere sahip hibrit iplik üretilmektedir.

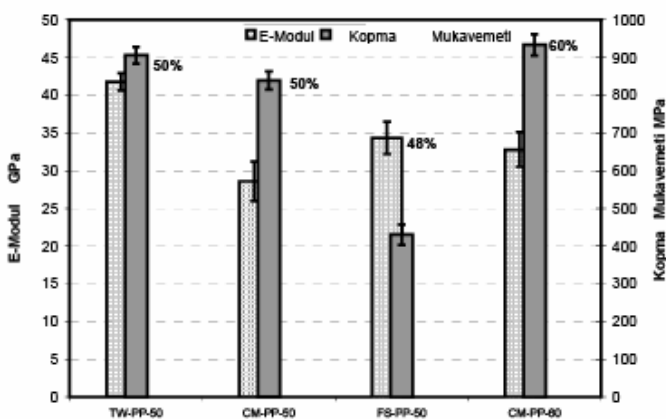
Tablo 2. Commingling, Twintex ve Friksiyon eğirme teknikleriyle elde edilmiş GF/PP hibrit ipliklerinin ve bunlardan elde edilen kompozitlerin özellikleri [58]

| Hibrit iplik üretim teknolojisi | Commingling (Hava jetli tekstüre) | | Friksiyon eğirme | Twintex (Online filament çekimi) |
|-------------------------------------|--------------------------------------|----------|---------------------|-------------------------------------|
| | CM-PP-50 | CM-PP-60 | FS-PP-50 | TW-PP-50 |
| Hibrit iplikler | | | | |
| Güçlendirici elyaf oranı (%) | 50 | 60 | 48 | 50 |
| İplik numarası (tex) | 416 | 374 | 450 | 1500 |
| E-Modül (GPa) | 28,6 | 32,8 | 34,3 | 41,8 |
| Kopma uzaması (%) | 2,5 | 2,6 | 1,5 | 6,6 |
| Darbe dayanımı (kJ/m ²) | 6,7 | 6,3 | 3,2 | 6,2 |
| Çekme Dayanımı (90°) (MPa) | 6,7 | 4,8 | 3,1 | 18,4 |
| Interlaminer kayma direnci (MPa) | 30 | 24,3 | 18,7 | 46,4 |



Şekil 16. Farklı tekniklerde üretilen hibrit ipliklerin mukavemet ve modüllerinin karşılaştırılması [57]

Choi [8] çalışmasında Commingling (COM), Schappe (SCH), paralel sarma (SBS), ve katlamalı büküm (ZWR) teknolojileri ile üretilmiş CF/PEEK hibrit ipliklerin ve bunlardan elde edilmiş kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiştir (Tablo 3). ZWR hibrit iplik üretim işlemi ipliğe verilen büküm sonucu CF filamentlerinin oryante olamaması nedeniyle SBS ipliklerine kıyasla, mukavemet değerleri önemli derecede düşüktür. Kopma uzaması ise yaklaşık %70 daha yüksektir. SCH hibrit iplikleri yapısında homojen bir şekilde dağılmış bir şekilde bulunan kesikli CF liflerinin birbirine tutunamaması nedeniyle mukavemet değerlerinin ölçülmesi zor olmaktadır. Hibrit ipliği saran filament yapısına rağmen kesikli CF ve PEEK liflerini bir arada tutan adezyon kuvvetinin zayıf olması nedeniyle en düşük mukavemet değerleri gözlemlenmiştir.



Şekil 17. Farklı hibrit ipliklerden elde edilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [57]

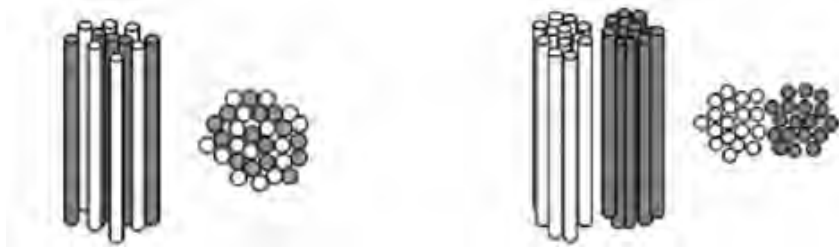
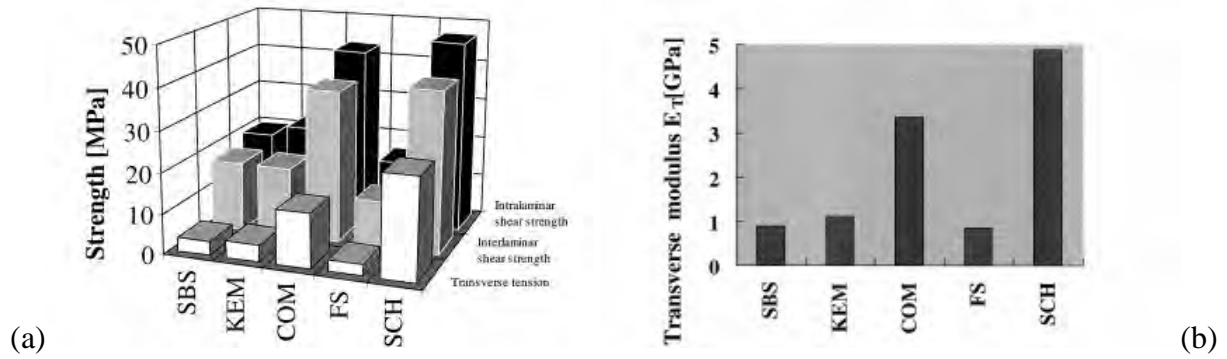
Gries ve ark. [59] çalışmalarında tekstil takviyeli beton elde etmek üzere güçlendirici olarak farklı hibrit iplikler kullanmışlardır. Commingling, friksiyon, katlamalı büküm ve kaplamalı ipliklerin etkisinin incelendiği çalışmada, karşılaştırma yapılabilmesi için işlem görmemiş güçlendirici filament fitili de kullanılmaktadır. Buna göre Commingling ve katlamalı büküm kullanılan takviyeli beton kompozitlerde diğer numunelere göre büyük oranda çekme dayanımı yükselmiştir. Çift yönlü çekme deneyinde commingling iplikli kompozit yapı % 80 daha yüksek dayanım göstermiştir. Ayrıca commingling iplik kullanılan kompozit, diğerlerine göre daha iyi taşıma kapasitesi görülmüştür.

4.3. Hibrit iplik kesitinde elyaf yerleşimi

Hibrit iplikler termoplastik kompozit üretiminde kullanılabilen yarı mamullerdir. Hibrit üretim teknolojilerinden kaynaklanan güçlendirici ve matris bileşenlerin iplik yapısında yerleşim şekli bunlardan elde edilecek kompozitin mekanik özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Bileşenlerin homojen bir şekilde dağılması istenmektedir. Böylece konsolidasyon işlemi termoplastik polimerin erime anında alacağı yol az olduğundan elde edilecek termoplastik kompozitin delaminasyon ve çatlak yayılması dayanımlarını etkilemektedir. [24] Bu nedenle matrislerin düzgün emdirilmesi elde edilecek yapının kalitesi için büyük önem arz etmektedir. Yapılan çalışmalar, ipliğin enine kesitinde bileşenlerin dağılımı düzgün olmayan hibrit ipliklerin (friksiyon eğirme, özlü ring eğirme gibi teknikler) emdirilmesinin sıkı paket yoğunluğu nedeniyle çok kötü olduğunu göstermektedir. Bu nedenle kompozitin mekanik özelliklerinin (kopma, eğilme, aşınma dayanımları) iplik yapısı daha doğrusu elyaf oryantasyonu ile ilgili olduğu söylenebilmektedir [8]. Şekilde Commingling (a) ve paralel sarma (b) teknikleriyle üretilen ipliklerin yapısında güçlendirici ve matris filamentlerin dağılımı gösterilmiştir. Her ne kadar commingling hibrit iplik üretiminde bileşenlerin düzgün ve homojen bir şekilde bir araya getirilmesi pratikte ve teoride çok daha zor bir proses gerektirse de, bu hibrit ipliklerden elde edilecek termoplastik kompozitlerin mekanik özellikleri paralel sarma işlemine göre çok daha iyi olacaktır [54].

Tablo 3. Comminglin (COM), Schappe (SCH), paralel sarma (SBS), ve katlamalı büküm (ZWR) teknolojileri ile üretilmiş CF/PEEK hibrit ipliklerinin özelliklerinin karşılaştırılması [8]

| Üretim teknolojisi | COM | SCH | SBS | ZWR |
|---------------------------------|------|------|------|------|
| Teorik CF oranı (%) | 61 | 54 | 61 | 61 |
| CF oranı (%) | 51,9 | 49,3 | 54,7 | 60,1 |
| Teorik iplik numarası (tex) | 296 | 313 | 287 | 311 |
| İplik kopma mukavemeti (cN/tex) | 49 | 30 | 63 | 40 |
| Kopma uzaması (%) | 1 | 8 | 0,9 | 2,2 |

**Şekil 18.** Farklı hibrit iplik yapıları (a) Commingling (b) Paralel sarma [54]**Şekil 19.** Farklı hibrit ipliklerden elde edilen kompozitlerin (a) enine çekme dayanımı, interlaminar ve intralaminar kesme dayanımları (b) Enine Modülü [24]

Homojen bir dağılımın yanında yapılan çalışmalar güçlendirici ve matris filament ipliklerin elyaf çaplarının aynı veya birbirine yakın seçilmesinin de daha iyi emdirme sağladığı belirtilmektedir. [60]

Lauke ve ark. [24] yaptıkları çalışmada Hava jetli tekstüre- Commingling (COM), Schappe (SCH), Frikasyon eğirme (FS), ve Kemafil (KEM) teknolojileriyle üretilmiş PA/GF hibrit iplikleri kullanılarak üretilen ipliklerin bunlardan elde edilen termoplastik kompozitlerin mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir (Şekil 23). COM ve SCH teknolojileri ile üretilen hibrit iplikler güçlendirici elyafın belli düzlemde yerleşmemiş olması ve güçlendirici ve matris bileşenlerin birbiri içerisinde düğümlü, karmaşık bir yapıda bulunması nedeniyle delaminasyon durumuna daha dayanıklıdır. Özellikle COM hibrit iplikler uygun bir yüzey apresi uygulandığında diğer

tekniklere kıyasla önemli derecede daha yüksek kesme dayanımı ve enine çekme dayanımı göstermektedir [61].

4.4. Sürtünme, esneklik, sıklık özellikleri

Dokuma, örme gibi yüksek hızlarda çalışılan tekstil işlemlerinde kullanılan iplikler metal veya diğer ipliklerle sürtünme yaşarlar. Aşırı sürtünme iplik kopuşlarına veya ve iplikten elde edilecek son ürünün mekanik özelliklerine olumsuz etki edebilmektedir. Bu yüzden iplik yapısında tüylülük gibi ipliğe hacimlilik kazandıran iplikler tekstil proseslerinde sorun yaşatmışlardır. Termoplastik kompozit üretiminde yüksek hacimli hibrit ipliklerle çalışılmasında karşılaşılabilecek problemler aşağıdaki olabilmektedir:

- Hacimli yapılarla elde edilen ürünlerde düzgün kenar hatları elde edilemeyeceğinden kaliteli kompozitlerin üretilmesi zor olabilmektedir.

- Daha hacimli preformdan daha az hacimli preforma göre aynı kalınlıkta parça üretmek için daha derin kalıp boşluğu gerekmektedir.
- Hacimli preformla parça üretilmesinde öngörüle bulunmak ve elyaf oryantasyonunu kontrol etmek zor olmaktadır. Kalıbın parçaları birbirine daha uzak olacak bu da elyaf oryantasyonunu daha da azaltacaktır. Bu nedenle preform yapısı ve elde edilen kompozit için daha az tüylü, kapalı yapıda hibrit iplik yapısı önemlidir.

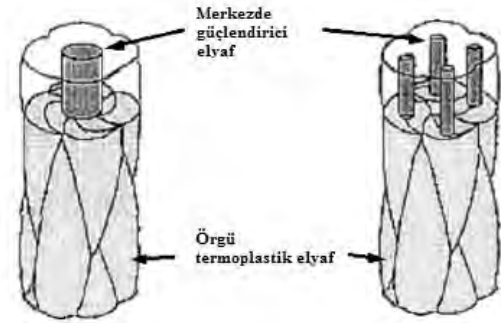
5. HİBRİT İPLİKLERİN GELECEĞİ

Elyaf takviyeli kompozitlerin geliştirilmesi ile beraber mekanik dayanım ve sertlik beklentilerinden ödün vermeden ağırlık tasarrufu ve enerji verimliliğini mümkün kılacak hafif malzemelerin elde edilmesi mümkün hale gelmiştir. Yüksek mukavemetli elyaf ve özel matris malzemelerin kombine edildiği üretim teknikleri geliştirilmiştir. Duroplastik matrislere göre birçok üstünlüğü bulunan termoplastik matrislerde görülen yüksek erime viskozite sorunu da hibrit iplik üretimi ile aşıldıktan bu alanda ürün ve proseslerde gelişmeler çok hızlı bir şekilde yaşanmıştır.

Birçok üretim tekniğinde yeterli çalışma yapılmasına rağmen yeni iplik yapıları ve prosesleri geliştirme, veya mevcut ürün ve proseslerin yerine yenilerini bulmak yada modifiye etme çalışmaları sürmektedir. Schappe teknolojisinin (Bölüm 3.10) tow kırma işlemi ile elde edilen kesikli elyaf şeritinden sargı filamentleri yardımıyla yeni bir hibrit iplik elde edilmesi veya kemafil teknolojisinin (Bölüm 3.9) örme tekniğinden yararlanılarak geliştirilmesi buna örnek verilebilir. Özellikle hava jetli tekstüre ve puntalama kullanılarak hibrit iplik elde edilmesinde proses şartlarının geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir [62, 63]

Diğer bir potansiyel araştırma alanı da farklı yapılarda hibrit ipliğin tek bir makine de elde edilebilmesi ya da farklı tekniklerin tek makinede birleştirilmesi ile ilgili araştırmalardır. Agteks firmasının geliştirdiği Direct-Twist makinesi (Bölüm 3.5) buna örnek verilebilir. Büyük pazar potansiyeline sahip olabilecek bir gelişme de hava jetli tekstüre ve büküm işleminin birleştirilmesi ile birlikte commingling oyuk iş tekniklerinin birlikte kullanılabilmesine imkan veren bir makinenin geliştirilmesidir [46].

Yeni hibrit iplik yapısı ve prosesi geliştirme ile ilgili çalışmalarından biri de Kyoto Üniversitesi (Japonya)'nde geliştirilen ve adına 'micro braiding' (mikro örgü) verdikleri yeni bir ön emdirme işlemidir. Tow formunda karıştırılmış bir şekilde üretilen güçlendirici ve matris filamentler, değişik oranlarda ayarlanabilen, sayısız bir bileşen karışımı imkanı vermektedir [64].



Şekil 20. Micro braided hibrit iplik yapısı [63]

Tüm tekstil endüstrisinde olduğu gibi hibrit iplik teknolojisinde mikro ve nanoteknoloji uygulamaları kullanılabilir. Golzar [52] tez çalışmasında 6 µm kalınlığa kadar PEEK filamentleri geliştirerek, ultra ince filamentlerle PEEK/CF hibrit iplikler elde etmiştir. Bu iplikler kullanılarak üretilen termoplastik kompozitlerin emdirme derecelerinin çok yüksek olduğu belirtilmektedir.

Yapılan çalışmalarda elektrospinning kullanılarak kaplamalı monofilamentlerden oluşan ve büküm verilerek kohezyon kuvveti kazanmış hibrit iplik elde edilmiştir. Mekanik özellikleri ayarlanabilen yüksek gözenekliliğe sahip bu iplikler suni kas veya bağ doku elde edilmesinde kullanılmaktadır [66].

Termoplastik kompozitlerde uygulanan yükler güçlendirici elyaf tarafından taşınır. Matrisin ana görevi yükleri elyafa ve bir elyaftan diğer elyafa iletmektir. Yüklerin iletimi güçlendirici ve matris bileşenlerin dış yüzeyinde gerçekleşmektedir. Bu yüzden nanoteknoloji ile üretilen hibrit ipliklerde filamentlerin yüzey özelliklerini geliştirme çalışmaları yoğunluktadır. Karbon nano tüp/grafen hibrit iplik çalışmalarının da online çekim tekniği kullanılarak başladığı görülmektedir [67]. Nano tüp ve online çekim işlemi teknolojilerinin birleştirilmesiyle beraber, tek yüzeyde oluşturulan, yüzey özellikleri geliştirilmiş güçlendirici/matris bileşenlerin oluşturduğu benzersiz hibrit iplikler elde edilebilecektir.

Bir diğer gelişim gösteren alan da üretim işleminin daha esnek hale getirilmesi ve filamentlerin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi ile birlikte kaplama, avivaj işlemlerinin geliştirilmesi ile online hibrit iplik üretim teknolojisi olmaktadır [35-37].

İletken malzemelerin filament ya da kesikli elyaf şeritleri halinde kullanılması ile birlikte akıllı tekstillerde kullanılacak iletken hibrit iplikler geliştirilebilmektedir [19]. Karbon elyafının iletkenlik özelliğinden yararlanılarak geliştirilen bir çalışmada da DREF 2000 eğirme sisteminde geliştirilen hibrit iplikler tekstil takviyeli beton ürünlerin ısıtılmasında kullanılmaktadır. Bu yöntemle geliştirilen ipliklerin özünde bulunan iletken karbon filamentlerinin çevresine kısa kesilmiş cam ve PP lif şeriti beslenerek hibrit iplik haline getirilmektedir [68, 69]. TTK ürünlerde diğer bir iletkenlik sağlama durumu, GF/PP hibrit ipliklerde elde edilen 3 boyutlu dokuma plakalarda dokuma makinesinde belirli aralıklarla karbon multifilament iplik atılmasıyla sağlanabilmektedir [70]. Ayrıca gümüş nano parçacıkları içeren nano filamentler halinde bir araya getirilen hibrit ipliklere antibakteriyel özellik de verilebilmektedir [71].

TTK ürünlerin elde edilmesinde genellikle CF, GF gibi yüksek performanslı liflerde kullanılmasına rağmen son yıllarda yürütülen çalışmalarda başta keten elyafı olmak üzere doğal elyafların da kullanıldığı görülmektedir. Baghei ve ark. çalışmalarında [72,73] güçlendirici filament olarak keten elyafı matris bileşen olarak da Polilaktik asit (PLA) kullanmışlardır. Sarmal iplikçilik tekniği kullanılarak elde edilen hibrit ipliklerden elde edilen TTK ürünlerin mekanik ve termal özellikleri geliştirilmekte olup, bu çalışmaların sonucunda çevre dostu kompozit ürünlerin elde edilebileceği belirtilmektedir.

Hibrit iplikler kullanılarak elde edilen TTK ürünlerin üretiminde yürütülen diğer araştırma konusu da bunların işlenmesi için lazer radyasyonu gibi teknolojilerden yararlanması ilgili çalışmalardır [74]. Üretim öncesi ve sonrasında uygulanacak kalite testleri, analiz ve simülasyonlarının geliştirilmesi ile ilgili de çalışmalar devam etmektedir [75,76].

Her geçen yıl artan tekstil takviyeli kompozit kullanımını ile beraber, bu malzemelerin geri kazanılması ile ilgili çalışma yapma ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bunların geri dönüşümünden elde edilecek kesikli lifler de hibrit iplik üretiminde kullanılabilirlerdir.

Günümüzde yeni teknik tekstillerin geliştirilmesinde genel yaklaşım, geleneksel malzemelerin ihtiyaçlara cevap verememesi üzerine ürün ve proseslerin pazar ihtiyaçlarına uygun bir şekilde geliştirilmesi şeklindedir. Hibrit ipliklerin gelişim rotasını da bu ihtiyaçlar belirleyecektir. Fakat bu ürünlerin üretiminde ve kullanımında çevresel etkiler göz ardı edilmemelidir.

KAYNAKLAR

1. http://ec.europa.eu/clima/policies/roadmap/index_en.htm, 16.12.2014
2. <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/>, 16.12.2014
3. http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm, 16.12.2014
4. R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH (2009), Handbuch Faserverbundwerkstoffe
5. Mountasir, A. (2009), Erweiterung und geometrische Modellierung der spacer fabric Strukturen in Kombination von Faltenweb- und Jacquardeinrichtung im Hinblick auf die Funktionsintegration, Technische Universität Dresden, ITM, Master-Arbeit Nr:1357, 2009
6. Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S. (1996) Faserverbundbauweisen, Halbzeuge und Bauweisen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN: 3540606165
7. Schemme, M., Werkstoffliche Grundlagen langfaserverstärkter Thermoplaste Werkstoffliche Grundlagen, EATC Automative Seminar, Wolsburg/Germany, 01.07.2003
8. Choi, B.D. (2005): Entwicklung von Commingling-Hybridgarnen für faserverstärkte thermoplastische Verbundwerkstoffe. Technische Universität Dresden, Dissertation
9. Lehmann, B.; Herzberg, C. (2011): Garnkonstruktionen und Garnbildungstechniken. In: Cherif, Ch. (Hrsg.): Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, ISBN 978-3-642-17991-4, S. 111-170
10. Wulforth, B.; Tetzlaff, G.; Kaldenhoff, R., (1992), Herstellung von Hybridgarnen für den Einsatz in Faserverbundwerkstoffen Chemiefasern/Textilindustrie 42/94, H. März, S. T10-T11
11. Gong, R., H., (2011), Specialist yarn and fabric structures, developments and applications, Woodhead Publishing Limited, Part 2 s.21-55
12. Sawhney, A., P., S., Ruppenicker, G., F., Kimmel, L., B., Robert, K., Q., (1992), Comparison of filament-core spun yarns produced by new and conventional methods, Textile Research Journal, 62(2), 67-73
13. Wu, W., Y., Lee, J., Y., (1995), Twist in the Spinning of a Composite Yarn, Textile Research Journal, 65:522-526.
14. Huh, Y., Kim, Y., R., Oxenham W., (2002), Analyzing Structural and Physical Properties of Ring, Rotor, and Friction Spun Yarns, Textile Research Journal; 72; 156, DOI: 10.1177/004051750207200212
15. Basu, A., (2000), Influence of Yarn Structural Parameters on Rotor-spun Yarn Properties, The Journal of The Textile Institute, 91:1, 179-182, DOI: 10.1080/00405000008659498

16. Pouresfandiari F., Fushimi, S., Sakaguchi A., Saito, H. Toriumi, K., Nishimatsu, T., Shimizu, Y., Shirai, H., Matsumoto, Y., I., Gong, H., (2002), Spinning conditions and characteristics of open-end rotor spun hybrid yarns, *Textile Research Journal*, 72 (1), 61–70
17. Cheng, K., B., Murray, R., (2000), Effects of Spinning Conditions on Structure and Properties of Open-End Cover-Spun Yarns, *Textile Research Journal*, 690-5
18. Klein W., (2009), *The rieter Manuel of spinning Volume VI*, The Textile Institute, Manchester, Woodhead Publishing, UK.
19. Cheng, K., B., Cheng, T., W., Lee, K., C., Ueng, T., H., Hsing, W., H., (2003), Effects of yarn constitutions and fabric specifications on electrical properties of hybrid woven fabrics, *Composites: Part A* 34 971–978
20. Fischer TECH GARNE GmbH, <http://www.fischertechgarne.at/>, 31.12.2014
21. Kaldenhoff, R., (1995), *Friktionsspinn-Hybridgarne als neuartige textile Halbzeuge zur Herstellung von Faserverbundkunststoffen*, Dissertation, ITA Aachen
22. Abbott, G., M., Freischmidt, G., (1985), Wrapped-yarn reinforced composites. II. Composite properties, *Composites Science and Technology*, 24(2), 147–158.
23. Sawhney, A., P., S., Ruppenicker, G., F., Kimmel L., B., Robert, K., Q., (1992), Comparison of filament-core spun yarns produced by new and conventional methods, *Textile Research Journal*, 62(2), 67–73.
24. Lauke, B., Bunzel U., Schneider, K., (1998), Effect of hybrid yarn structure on delamination behavior of thermoplastic composites, *Composites Part A: Applied Sciences and Manufacturing*, 29, 1397–1409.
25. Wulfhorst, B., (2003), *Tekstil Üretim Yöntemleri*, Çev.: Demir, A., Torun, A., R., Carl Hanser Verlag, München
26. Patent TR200301753A2 (2005), Ön hazırlıksız bobinlerden bobine direkt büküm yapabilen ve büküm sıklığı iğ hızından bağımsız ayarlanabilen büküm makinesi ve metodu, Ageteks örme ve tekstil endüstrileri san. ve. Tic. Ltd. şirketi
27. Paul, C., (2012), *Funktionalisierung von duroplastischen Faserverbundwerkstoffen durch Hybridgarne*, Vieweg+Teubner Verlag
28. Patent US 4856147, (1989) Composites of stretch broken aligned fiber carbon and glass reinforced resin, Armiger T. E. , Edison D. H. , Lauterbach H. G. , Layton J. R. , Okine R. K.,
29. Patent, WO8901999 (A1), (1989) Hybrid Yarn, Heltra INC.
30. Braches, E., (1991), The use of hybrid yarns in the manufacture of fibre reinforced thermoplastic composite materials, *Proceedings of Techtexil Symposium*, Frankfurt, Germany
31. Gibson, A. , G., Manson, J., A., (1992) Impregnation technology for termoplastik matrix composites, *Composites Manufacturing*, 3:223-233.
32. Patent US 5425796 A (1995), Method of and an apparatus for forming a composite thread including stretching of thermoplastic filaments, Vetrotex France S.A.
33. Patent DE19915955A1 (2000), Vorrichtung zum Herstellen eines strangartigen Faserverbundes aus Glasfasern, Schuller GmbH
34. <http://www.ocvreinforcements.com/solutions/Thermopreg.aspx>, 31.12.2014
35. Mäder, E., Rothe, C., Gao, S., L., (2007), Commingled yarns of surface nanostructured glass and polypropylene filaments for effective composite properties. In: *Journal of Materials Science* 42 pp. 8062-8070
36. Mäder, E., Rothe, C., Brunig, H., Leopold, T., (2007), Online spinning of commingled yarns - equipment and yarn modification by tailored fibre surfaces. In: *Key Engineering Materials*, 334-335, S. 229–232. DOI 10.4028
37. Mäder, E., Rothe, C., (2006), Tailoring of commingled yarns for effective composite properties. In: *Chemical Fibers International* 56 (2006) pp. 298-300
38. Abounaim, M., D., Hoffmann, G., Diestel, O., Cherif, C., (2009), Development of flat knitted spacer fabrics for composites using hybrid yarns and investigation of two-dimensional mechanical properties. In: *Textile Research Journal* 79, Nr. 7, S. 596–610. DOI 10.1177/0040517508101462s
39. Mäder, E., Rausch, J., Schmidt, N., (2008), Commingled yarns – Processing aspects and tailored surfaces of polypropylene/glass composites, *Composites: Part A* 39 612–623
40. Demir, A., (2006), *Sentetik Filament İplik Üretim ve Tekstüre Teknolojileri*, Şan Ofset, İstanbul.
41. Alagirusamy R., and Ogale V., (2004), Commingled and Air Jet-textured Hybrid Yarns for Thermoplastic composites, *Journal of Industrial Textiles* 33: 223, DOI: 10.1177/1528083704044360
42. Bunzel, U., Lauke, B., Schneider, K., (1999), Air Textured Hybrid Yarn Structures and Their Influence on the Properties of Long Fiber Reinforced Thermoplastic Composites, *Technische Textilien*, 42(1): 10–12 + E2
43. Wakeman, M., D., Cain, T., A., Rudd, C., D., Brooks, R., Long, A., C., (1998), Compression Moulding of Glass and Polypropylene Composites for Optimised Macro- and Micro- Mechanical Properties – 1 Commingled Glass and Polypropylene, *Composite Science Technology*, 58(12): 1879–1898
44. Alagirusamy, R., Ogale, V. (2004). Commingled and Air Jet-textured Hybrid Yarns for Thermoplastic Composites. *Journal of Industrial Textiles*, 33(4), 223–243. doi:10.1177/1528083704044360
45. Alagirusamy, R., Ogale, V. (2008), Properties of GF/PP Commingled Yarn Composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 21, Nr. 6, S. 511–523. DOI 10.1177/0892705708091281
46. Mankodi, H., Patel, P., (2010), Study the effect of commingling parameters on glass/ poly-propylene hybrid yarn properties, *Autex Research Journal*, Vol 9, No 3
47. COMFIL: Yarns/Rovings. <http://www.comfil.biz/products/yarnsroving.php>, 31.12.2014
48. Patent DE202008013041, (2008), Linienförmiges Kunststoffprofil mit strukturierter Oberfläche, Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V.
49. <http://www.kvb-chemnitz.de/>, 31.12.2014
50. Schappe Techniques, <http://www.schappe.com/>, 31.12.2014

51. Patent FR2958663 (A1), (2011), Method for obtaining pre-consolidated hybrid thread i.e. carbon fibers, involves forming pre-consolidated hybrid wire by reducing mass volume of hybrid wire by subjecting portion of wire to predetermined pressure, Schappe SA
52. Golzar, M., (2004), Melt Spinning of Fine PEEK Filaments, PhD Thesis, TU Dresden, Germany.
53. Acar, M., Turton, R., K., Wray G., R., (1986), Analysis of the air-jet yarn-texturing process, IV-Fluid forces acting on the filaments and the effects of filament cross-sectional area and shape, *Journal of Textile Institute*, 77(4), 247-254.
54. M. Golzar, H. Brünig and E. Mäder, (2007), Commingled Hybrid Yarn Diameter Ratio in Continuous Fiber-reinforced Thermoplastic Composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 20; 17, DOI: 10.1177/0892705707068069
55. Abounaim, M., (2011), Process development for the manufacturing of flat knitted innovative 3D spacer fabrics for high performance composite applications, PhD Thesis, Technische Universität Dresden, Germany
56. Alagirusamy, R., Ogale, V. (2005), Development and Characterization of GF/PET, GF/Nylon, and GF/PP Commingled Yarns for Thermoplastic Composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*; 18; 269, DOI: 10.1177/0892705705049557
57. Choi, B., D., Diestel, O., Offermann, P., Hübner, T., Mäder, E., (2001), Weiterentwicklung von Commingling-Hybridgarnen für thermoplastische Faserverbundwerkstoffe 11. Textextil Symposium, Vortragsnummer 212/219
58. Optimierung des Commingling-Prozesses zur Herstellung von Hybridgarnen für langfaserverstärkte Thermoplaste (AiF-Projekt Nr. 11644 B), (1998-2000), TU Dresden, http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/itm/forschung/forschungsthemen/thermoplaste
59. Gries, T., Janetzko, S., Kravaev, P., (2011), Textile Verstärkungsstrukturen – Übersicht der Forschungsaktivitäten im Rahmen des SFB 532, 6th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS6)
60. Brünig, H., Beyreuther, R., Vogel, R. and Tändler, B., (2003), Melt Spinning of Fine and Ultra Fine PEEK-filaments, *J. Materials Science*, 38(10): 2149-2153.
61. Lauke, B., Bunzel U., Schneider, K., (1998), Delaminationsverhalten von langfaserverstärkten thermoplastischen UD-Verbunden, hergestellt aus unterschiedlichen Hybridgarnstrukturen, *Materialwiss. und Werkstofftechnik* 28, S. 465-474
62. Kravaev P., Stolyarov O., Seide G., Gries T., (2013) A method for investigating blending quality of commingled yarns, *Textile Research Journal* 83(2) 122-129, DOI: 10.1177/0040517512456760
63. Kravaev P., Stolyarov O., Seide G., Gries T., (2014) Influence of process parameters on filament distribution and blending quality in commingled yarns used for thermoplastic composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2014, Vol. 27(3) 350-363, DOI: 10.1177/0892705712446167
64. Sakaguchi, M., Nakai A., Hamada H., Takeda N., (2000), The Mechanical Properties of Unidirectional Thermoplastic Composites Manufactured by a Micro-Braiding Technique. *Composites Science and Technology*, 60: p. 717-722.
65. Laberge-Lebel, L., (2005), Manufacturing of Braided Thermoplastic Composites with Commingled Fibers, M.Sc. Thesis, Concordia University, Canada
66. Zhou, F., L., , Gong, R., H., Porat, I., (2010), Nano-coated hybrid yarns using electro spinning, *Surface and Coatings Technology* , 204 , 3459 – 3463
67. Foroughi, J., Spinks, G., M., Antiohos, D., Mirabedini, A., Gambhir, S., Wallace, G., G., Shaban R. Ghorbani, G., S., Peleckis, G., Kozlov, M., E., Marcio D., Lima, E., M., Baughman, R., H., (2014), Highly Conductive Carbon Nanotube-Graphene Hybrid Yarn, *Adv. Funct. Mater.*, 24, 5859-5865
68. Hasan M., M., B., Offermann M., Haupt M., Nocke A., Cherif, C., (2014), Carbon filament yarn-based hybrid yarn for the heating of textile-reinforced concrete, *Journal of Industrial Textiles*, 44: 183, DOI: 10.1177/1528083713480380
69. Hasan M., M., B., Nocke A., Cherif, C., (2013), High Temperature Resistant Insulated Hybrid Yarns for Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites, *Journal of Applied Polymer Science*, DOI: 10.1002/APP.39270
70. Mountasir A., Hoffmann G., Cherif C., (2013) Development of multilayered woven panels with integrated stiffeners in the transverse and longitudinal directions for thermoplastic lightweight applications, *Textile Research Journal* 83(14) 1532-1540, DOI: 10.1177/0040517512474367
71. Barani, H., (2014), Antibacterial continuous nanofibrous hybrid yarn through in situ synthesis of silver nanoparticles: Preparation and characterization, *Materials Science and Engineering C*, 43, 50-57
72. Baghaei, B., Skrifvars M., Berglin, L., (2013), Manufacture and characterisation of thermoplastic composites made from PLA/hemp co-wrapped hybrid yarn prepregs, *Composites: Part A*, 50, 93-101, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.10.011>
73. Baghaei, B., Skrifvars M., Berglin, L., (2015), Characterization of thermoplastic natural fibre composites made from woven hybrid yarn prepregs with different weave pattern, *Composites: Part A* 76 (2015) 154-161
74. Köckritz, T., Schiefer T., Jansen, I., Beyer E., (2013), Improving the bond strength at hybrid-yarn textile thermoplastic composites for high-technology applications by laser radiation, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 46(2013)85-94
75. Thieme M., Boehm R., Gude, M., Hufenbach, W., (2014), Probabilistic failure simulation of glass fibre reinforced weft-knitted thermoplastics, *Composites Science and Technology* 90 (2014) 25-31, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.10.011>
76. Döbrich, O., Gereke, T., Cherif, C., Krzywinski, S., (2013) Analysis and finite element simulation of the draping process of multilayer knit structures and the effects of a localized fixation, *Advanced Composite Materials*, 22:3, 175-189, DOI:10.1080/09243046.2013.791239